

## Conception et simulation d'un banc de mesure de la caractéristique I - V des modules photovoltaïques

A. Triki <sup>1\*</sup>, A. Mahrane <sup>1</sup>, A. Guenounou <sup>1</sup> et M. Laghrouche <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Unité de Développement des Equipements Solaires, UDES  
Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER  
42002, Tipaza, Algeria

<sup>2</sup> Laboratoire d'Analyse et de Modélisation des Phénomènes Aléatoires, Lampa  
Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou, Algeria

(reçu le 10 Décembre 2013 – accepté le 29 Mars 2014)

**Résumé** – Cet article est consacré à la conception et à la simulation d'un banc de mesure de la caractéristique I-V des modules photovoltaïques (PV). Ce banc permet la mesure, ainsi que l'acquisition de l'éclairement, de la température et de la caractéristique I-V. Il est constitué de trois parties: une charge électronique à base de MOSFET, un étage de mesure de la tension et du courant du module PV, ainsi que l'éclairement et la température du module et d'une carte Arduino Uno utilisée comme interface d'acquisition entre le bloc de mesure et un PC. Les résultats de simulations valident le bon fonctionnement du banc de mesure.

**Abstract** - This paper is devoted to the design and simulation of a I-V solar module test bench. This bench allows the measurement and the acquisition of the irradiance, the module temperature and the I-V characteristic. It consists of three parts: the first part is an electronic load based on MOSFET. The second part is a measuring stage of the current and voltage of the PV module and the irradiation and the module temperature. The last part is an Arduino Uno card, used as an acquisition interface between the measuring unit and a PC. The Simulation results validate the proper operation of the PV module tester bench.

**Mots clés:** Module photovoltaïque - Caractéristique I–V - Charge électronique - Carte Arduino.

### 1. INTRODUCTION

Les performances des modules photovoltaïques sont basées sur un certain nombre de paramètres significatifs extraits à partir de la caractéristique I–V, tels que le courant de court-circuit  $I_{sc}$ , la tension en circuit ouvert  $V_{oc}$ , le courant  $I_{imp}$  et la tension  $V_{mp}$  au point de puissance maximale, le facteur de forme FF, la résistance série  $R_s$  et la résistance shunt  $R_{sh}$  [1].

Ces paramètres sont habituellement fournis par les fabricants aux conditions dites standard (STC), à savoir, un éclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Cependant, ces conditions ne sont que très rarement rencontrées en conditions réelles de fonctionnement [2].

Pour réaliser une installation photovoltaïque, il faut tout d'abord effectuer un dimensionnement qui est basé en partie sur l'estimation des caractéristiques électriques

---

\* ahcene@yahoo.fr

des modules qui seront utilisés. Cela requiert de transférer leurs données des conditions STC aux conditions extérieures du site considéré.

Afin d'améliorer la fiabilité de ces prévisions, des mesures sur site de la caractéristique I–V des modules PV sont réalisées. Celles-ci permettent de prendre en compte dans les simulations, les dégradations éventuelles que peuvent endurer les modules PV dans les conditions naturelles de fonctionnement. Ces mesures sont aussi utilisées pour détecter les modules défectueux ou tout autre défaut présent dans un système PV. L'organe principal du banc est la charge électronique qui fait varier la résistance de charge sur une large gamme en un temps très court. Les charges électroniques disponibles sur le marché sont souvent onéreuses ce qui nous a incité comme bon nombre de professionnels du domaine à concevoir une charge fiable mais plus accessible [3-5].

Notre article est consacré à la présentation d'un banc de mesure de la caractéristique I–V des modules PV. Après avoir donné le synoptique général du banc, nous présentons dans le détail les trois étages qui le composent, à savoir, la charge électronique, l'étage de mesure (courant, tension, température et éclairage) et l'étage d'acquisition et de traitement de données. Nous exposons ensuite les résultats de simulation obtenus pour chacun des étages du banc de mesure lors de la caractérisation des modules de différentes puissances (30W, 100W et 300W) sous différentes conditions d'éclairage et de température.

## 2. PRESENTATION GENERALE DU BANC DE MESURE I - V DE MODULES PHOTOVOLTAIQUES

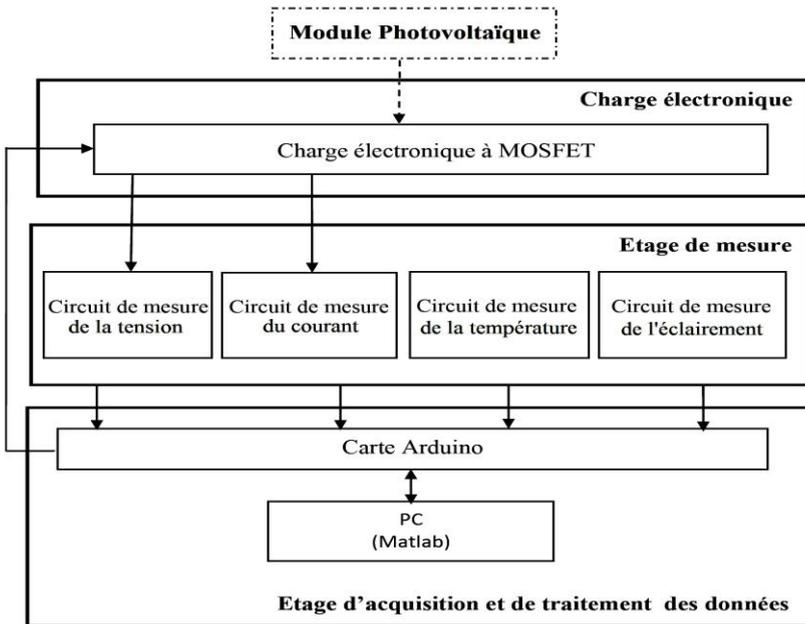


Fig. 1: Schéma synoptique du banc de mesure de I–V des modules photovoltaïques

Comme illustré par le schéma synoptique de la figure 1, le banc de mesure  $I - V$  des modules photovoltaïques est constitué de trois parties principales :

La première partie est constituée d'une charge électronique à MOSFET qui permet de faire varier la charge aux bornes du module PV et d'effectuer ainsi la mesure de la caractéristique  $I - V$ .

La seconde partie, qui constitue l'étage de mesure, est composée de quatre circuits effectuant la mesure et l'adaptation des grandeurs du courant et de la tension, constituant la caractéristique  $I - V$ , ainsi que la mesure de l'éclairement et de la température du module au moment du test de caractérisation.

La dernière partie est dédiée à l'acquisition des paramètres à mesurer. Elle est constituée d'une carte à microcontrôleur du type Arduino Uno [6], qui est connectée à un ordinateur PC. Cette carte est utilisée comme interface d'entrées/sorties pour le déclenchement des tests et l'acquisition sur PC des grandeurs mesurées.

### 3. CHARGE ELECTRONIQUE

La charge électronique utilisée est à base de Mosfet (Fig. 2) dont la description, la réalisation et le test sont décrits dans [7]. Son rôle est de faire varier l'impédance aux bornes du module photovoltaïque pour permettre la mesure de sa caractéristique  $I - V$ .

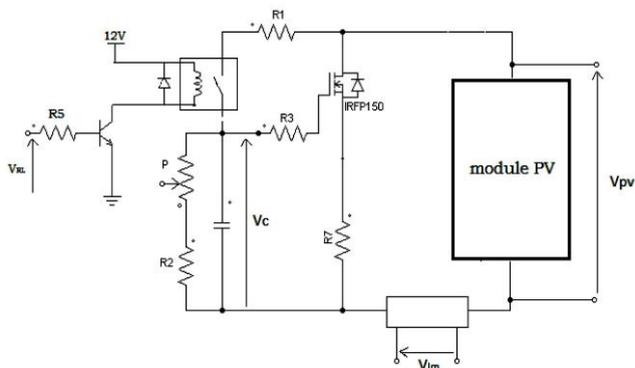


Fig. 2: Schéma électrique de la charge électronique à MOSFET [7]

Le principe de fonctionnement repose sur la variation de l'impédance de la charge (transistor MOSFET en série avec la résistance  $R_7$ ), connectée aux bornes du module photovoltaïque, par la variation de l'impédance du transistor MOSFET [8]. Pour ce faire, il suffit d'envoyer une impulsion courte pour fermer, puis ouvrir les contacts du relais, ce qui a pour effet de charger et puis de décharger le condensateur C à travers la résistance  $(P + R_2)$  et qui induit par voie de conséquence la variation de la tension de gâchette du MOSFET de la valeur maximale à une valeur nulle.

### 4. ETAGE DE MESURE

Ce circuit est composé de quatre parties permettant au banc de mesurer la caractéristique  $I - V$ , l'éclairement et la température du module photovoltaïque.

#### 4.1 Circuit de mesure de la tension du module $V_{pv}$

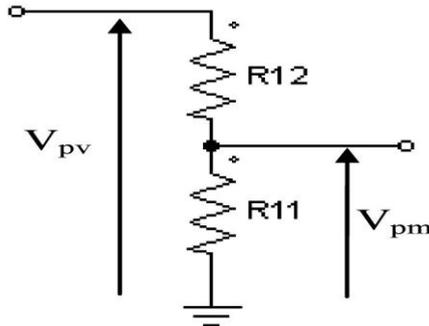


Fig. 3: Schéma du circuit de mesure de la tension

Ce circuit est un diviseur de tension (Fig. 3). Il permet de passer de la tension,  $V_{pv}$ , aux bornes du module photovoltaïque, à la tension,  $V_{pm}$ , comprise entre 0 et 5 volts, pour être ensuite mesurée par la carte Arduino.

La relation exprimant la tension  $V_{pv}$  en fonction  $V_{pm}$  est:

$$V_{pv} = V_{pm} \times \left( \frac{R_{11} + R_{12}}{R_{11}} \right) \quad (1)$$

#### 4.2 Circuit de mesure de courant du module $I_{pv}$

Ce circuit est composé d'un capteur de courant à effet hall, placé en série avec un diviseur de tension (Fig. 4). Le capteur de courant délivre à sa sortie une tension continue,  $V_{ipv}$ , proportionnelle à la valeur du courant,  $I_{pv}$ , fournie par le module PV.

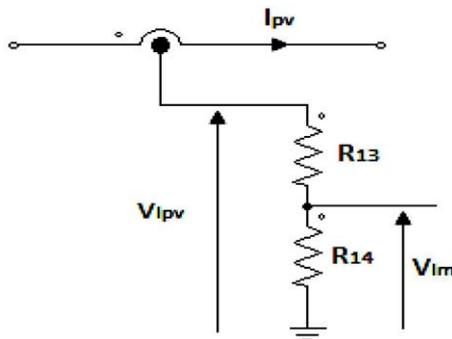


Fig. 4: Schéma du circuit de mesure de courant

Comme pour le circuit de mesure de tension, cette tension est divisée de sorte à ce qu'elle soit comprise entre 0 et 5 volts et être ainsi mesurable par la carte Arduino.

La relation donnant le courant en fonction de la tension  $V_{Im}$  a pour expression:

$$I_{pv} = \frac{V_{lm}}{A} \times \left( \frac{R_{13} + R_{14}}{R_{14}} \right) \quad (2)$$

Avec,  $A$  : Gain du capteur de courant.

### 4.3 Circuit de mesure de l'éclairement

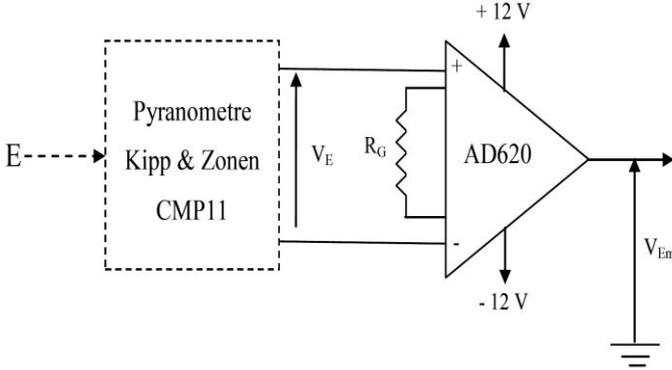


Fig. 5: Schéma du circuit de mesure de l'éclairement

La mesure de l'éclairement,  $E$ , est réalisée grâce à un pyranomètre du type Kipp & Zonen CMP11 [9], d'une sensibilité de  $8.44 \mu\text{V}/\text{W.m}^2$ , placé en série avec un amplificateur d'instrumentation AD620 (Fig. 5). Cet amplificateur dont le gain est réglable grâce à une seule résistance  $R_G$  permet d'amplifier les faibles tensions,  $V_E$ , issues du pyranomètre avec une bonne précision et un faible bruit.

Les relations régissant le fonctionnement de ce circuit sont données dans ce qui suit:

$$\begin{aligned} V_{Em} &= G \times V_E \\ G &= 1 + \frac{49.4 \text{ K}}{R_g} \\ V_{Em} &= S \times V_E \\ S &= 8.44 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2} \end{aligned} \quad (3)$$

ainsi l'éclairement,  $E$ , est défini en fonction de la tension de sortie de l'amplificateur,  $V_{Em}$ , par la relation suivante;

$$E = \frac{V_{Em}}{8.44 \times 10^{-6} \left( 1 + \frac{49.4 \text{ K}}{R_g} \right)} \quad (4)$$

### 4.4 Circuit de mesure de la température du module

Le rôle de ce circuit est de mesurer la température du module PV. Comme illustré en figure 6, ce circuit est composé d'un capteur de température RTD de type PT100, fixé au dos du module PV et connecté à un circuit de conditionnement.

Pour chaque température  $T$ , la PT100 présentera une résistance  $R_{pt100}$  définie par [10]:

$$R_{pt100} \approx 0.385T + 100 \quad (4)$$

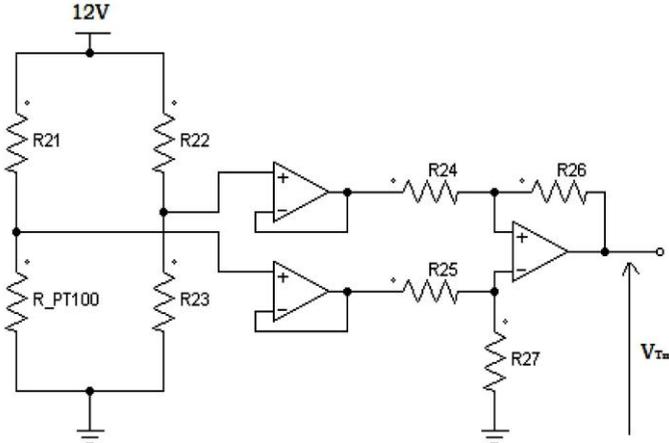


Fig. 6: Schéma du circuit de mesure de la température du module

A partir de cette résistance, le circuit de conditionnement génère à sa sortie une tension  $V_{Tm}$ , proportionnelle à la température  $T$  telle que:

$$V_{Tm} = 12 \times \left( \frac{0.385 T \times R_{26}}{R_{24} \times R_{21}} \right) \quad (5)$$

d'où:

$$T = V_{Tm} \times \left( \frac{R_{24} \times R_{21}}{12 \times 0.385 \times R_{26}} \right) \quad (6)$$

## 5. ETAGE D'ACQUISITION ET DE TRAITEMENT DE DONNEES

Cet étage est constitué d'une carte d'entrée/sorties de type Arduino Uno utilisée comme interface entre le bloc de mesure et un Pc dans lequel est implémenté un programme, sous l'environnement Matlab, permettant de piloter la carte interface pour déclencher les tests de mesures et leur acquisition.

La carte Arduino Uno (Fig. 7), construite autour d'un circuit à microcontrôleur du type d'Atmel ATMEGA 328 p, est basée sur une interface entrée/sortie simple et d'un environnement de développement proche du langage C. Elle est dotée de:

- 14 broches en input/output digitales fonctionnant avec une tension 5 V dont 6 peuvent être utilisées comme sorties MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions),
- 06 entrées analogiques convertissant une tension analogique comprise entre 0 et 5 V en une valeur numérique d'une résolution de 10 bits,
- un oscillateur à quartz de 16 MHz,
- une connexion USB,

- et des éléments suivants: un connecteur jack pour alimenter la carte à partir d'une source externe 7/12V, un support ICSP et un bouton 'reset'.

La carte Arduino Uno peut être utilisée pour construire des objets interactifs indépendants, ou bien pour être connectée à un ordinateur pour la communication et la supervision par le biais de logiciels de programmation (Matlab, Labview, etc) [11].

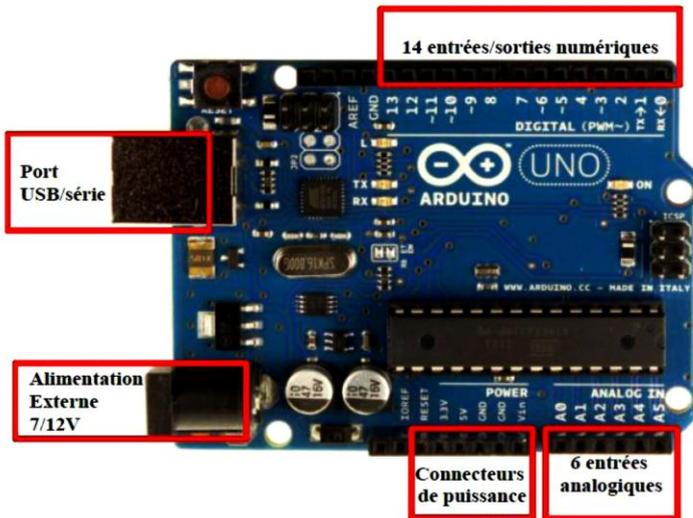


Fig. 7: Carte Arduino Uno [6]

Les connexions externes de la carte Arduino sont représentées sur la figure 8.

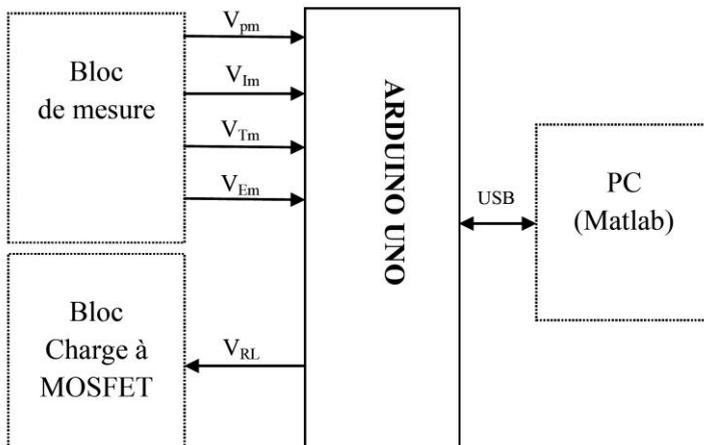


Fig. 8: Les connexions externes de la carte Arduino

Comme illustré par l'organigramme de la figure 9, le programme élaboré sous Matlab pour piloter la carte Arduino s'exécute en 4 étapes.

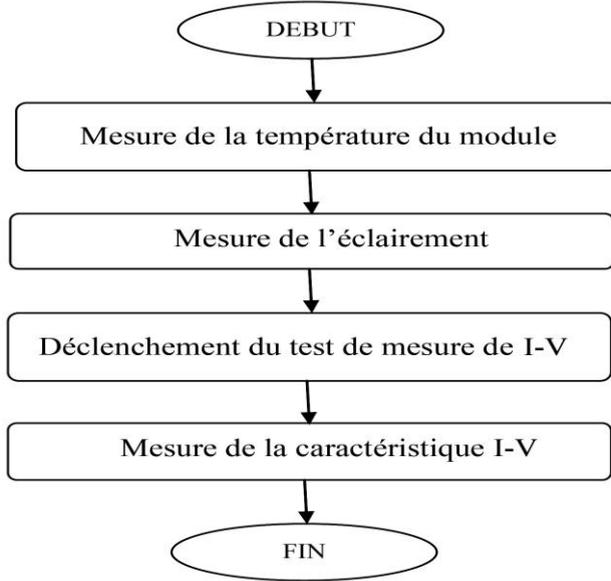


Fig. 9: Organigramme du programme pilotant la carte Arduino

### 5.1 Mesure de la température du module

La mesure de la température du module est effectuée en premier lieu par la mesure de la tension,  $V_{Tm}$ , se présentant sur la broche analogique  $A_4$ . En second lieu, la relation (4) est appliquée pour obtenir la température du module en  $^{\circ}C$ .

### 5.2 Mesure de l'éclairement

La mesure de l'éclairement est réalisée après la mesure de la tension  $V_{Em}$ , connectée à la broche  $A_3$  de la carte Arduino. La relation (6) est appliquée pour déterminer l'éclairement en  $W/m^2$ .

### 5.3 Déclenchement du test de mesure de I-V

Le déclenchement du test de mesure de I-V s'effectue par la mise à un, pendant 2 secondes, suivie d'une remise à zéro de la broche digitale 10 configurée préalablement en sortie numérique.

### 5.4 Mesure de la caractéristique I-V

La mesure de la caractéristique I-V se déroule pendant une période suffisante pour couvrir toute la caractéristique du module PV à caractériser. Dans un premier temps, il se déroule la lecture continue des tensions  $V_{pm}$  (broche  $A_1$ ) et  $V_{Im}$  (broche  $A_2$ ).

Puis, dans un deuxième temps, il s'effectue l'exécution du sous programme qui utilise les relations (1) et (2) pour obtenir la caractéristique sous forme d'un vecteur des valeurs de courant en Ampères et d'un vecteur des valeurs de tensions en Volts.

## 6. VALIDATION PAR SIMULATION DES DIFFERENTS ETAGES DU BANC DE MESURE I–V

Avant de passer à la réalisation du banc de mesure I–V , nous avons procédé à la simulation de chacun des étages qui le constituent pour nous assurer de leur bon fonctionnement.

### Simulation de la charge électronique et des circuits de mesure de tension et de courant

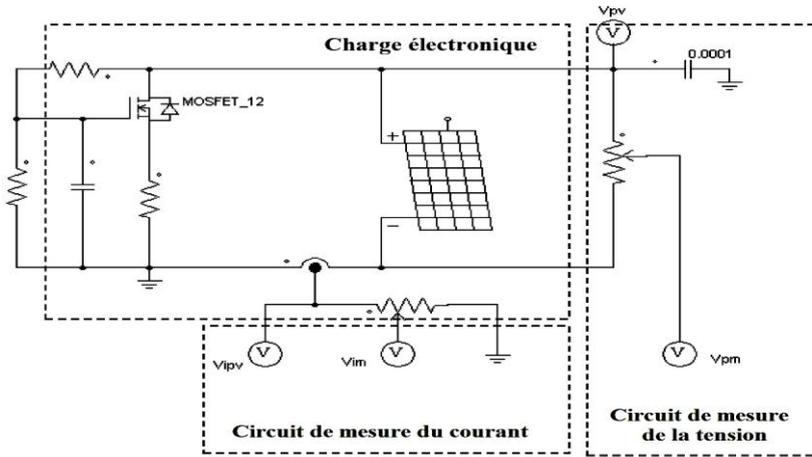


Fig. 10: Schéma de simulation de la charge électronique et des circuits de mesure de tension et de courant

Les simulations de l'ensemble charge électronique - circuit de mesure de courant et circuit de mesure de tension de la figure 10, ont été effectués avec le logiciel PSIM.

Pour tester l'aptitude de ce banc à caractériser, tous les modules présents sur le marché, trois différents types de modules PV représentatifs de ce dernier ont été considérés (**Tableau 1**).

**Tableau 1:** Spécifications techniques des modules utilisés pour les simulations

	Module 30 Wc	Module 100 Wc	Module 300 Wc
Puissance au point de puissance maximale, $P_{pm}$ , (W)	30	100	300
Tension au point de puissance maximale, $V_{pm}$ , (V)	17.5	18	37.62
Courant au point de puissance maximale, $I_{pm}$ , (A)	1.68	5.56	7.98A
Tension en circuit ouvert, $V_{oc}$ , (V)	21	21.6	44.62
Courant de court-circuit, $I_{sc}$ , (A)	1.88	6.06	8.56

Spécifications techniques à STC (1000 W/m<sup>2</sup>, 25 °C)

La figure 11 représente les courbes I–V et P–V simulées obtenues à la sortie de la charge électronique pour chacun des modules considérés. Nous constatons que les données caractéristiques ( $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $V_{mpp}$  et  $I_{mpp}$ ) qui sont déduites des courbes I–V sont du même ordre de grandeur que celles fournies par le constructeur (**Tableau 2**).

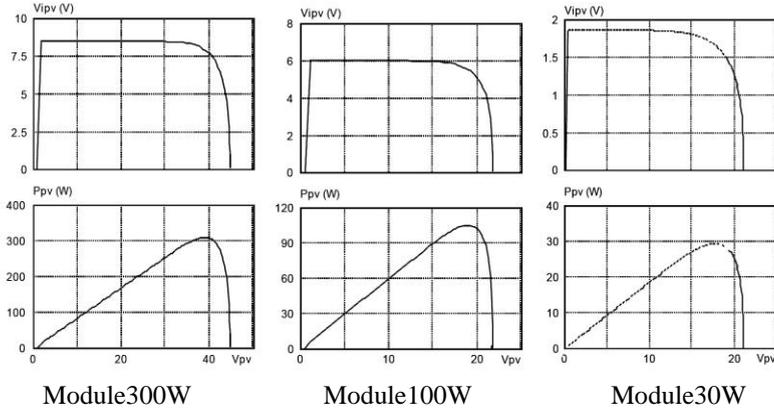


Fig. 11: Caractéristiques I-V et P-V obtenues par simulation en entrée des circuits de mesure de courant et de tension

**Tableau 2:** Valeurs des caractéristiques électriques fournies par le fabricant à STC et celles obtenues par simulation à l'entrée des circuits de mesure pour les trois modules utilisés

Modules	Caractéristiques	$V_{oc}$ (V)	$I_{sc}$ (A)	$V_{mpp}$ (V)	$I_{mpp}$ (A)
Module 300 W	Considérées	44.62	8.56	37.62	7.98
	Mesurées	44.65	8.56	37.87	8.17
Module 100 W	Considérées	21.6	6.06	18	5.56
	Mesurées	21.6	6.05	18.5	5.55
Module 30 W	Considérées	21	1.88	17.5	1.68
	Mesurées	21.01	1.87	17.5	1.67

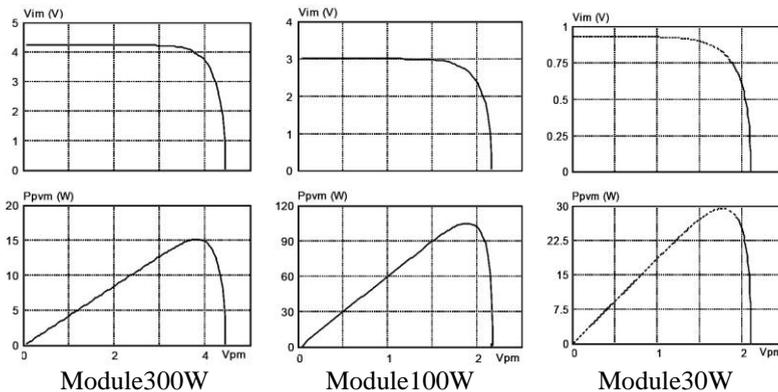


Fig. 12: Caractéristiques I-V et P-V mesurées en sortie des circuits de mesure de mesure de courant et de tension

Par ailleurs, en sorties des circuits de mesure du courant et de tension, nous avons obtenues deux tensions  $V_{ipvm}$  et  $V_{pvm}$  dont les valeurs correspondent respectivement aux valeurs du courant  $I_{pv}$  et de la tension  $V_{pv}$  du module photovoltaïque sous test divisées respectivement par les gains des circuits de mesure de tension (0.1) et de courant (0.5) (Fig. 12). Ceci étant conforme aux contraintes imposées par la carte d'interface pour toute donnée devant subir un traitement par cette dernière.

Simulation du circuit de mesure de l'éclairement

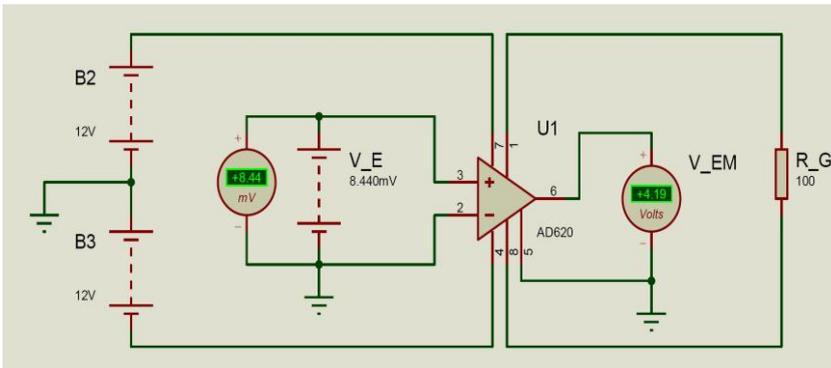


Fig. 13: Schéma de simulation du circuit de mesure de l'éclairement

Pour tester le fonctionnement du circuit de mesure de l'éclairement (Fig. 13), ce dernier a été saisi et simulé avec le logiciel Isis Proteus. Nous avons utilisé la relation (3) pour calculer les valeurs de tensions,  $V_E$ , susceptibles d'être délivrées par le pyranomètre pour un ensemble de valeurs d'éclairements,  $E$ , pouvant être mesurées pendant une journée bien ensoleillée (valeurs variant entre 0 et  $1100 \text{ W/m}^2$ ).

Nous avons alors vérifié que les tensions,  $V_{Em}$ , mesurées en sortie de l'amplificateur d'instrumentation en réponse aux tensions  $V_E$  présentes à l'entrée sont à  $\pm 1 \%$  près celles calculées par la relation (4) (**Tableau 3**).

**Tableau 3:** Résultats de simulation du circuit de mesure de l'éclairement

$E$ ( $\text{W/m}^2$ )	$V_E$ ( $\mu\text{V}$ ) calculée par la relation (3)	$V_{Em\text{-cal}}$ (V) Calculée par relation (4)	$V_{Em\text{-sim}}$ (V) Mesurée par simulation
0	0	0	0
100	844	0.42	0.43
400	3376	1.67	1.68
600	5064	2.51	2.51
900	7596	3.76	3.77
1000	8440	4.18	4.19
1100	9584	4.60	4.6
1200	10128	5.01	5.02

Simulation du circuit de mesure de température

Pour vérifier le fonctionnement du circuit de mesure de température (Fig. 14), celui-ci a été saisi et simulé avec le logiciel PSIM pour un ensemble de valeurs de la résistance

$R_{PT100}$ , représentant la résistance de la sonde PT100, correspondantes à des températures,  $T$ , comprises entre 0 et 80 °C. Nous avons constaté que les tensions,  $V_{Tm}$ , mesurées en sorties du circuit de mesure de température sont à  $\pm 2\%$  près égales a celle obtenues théoriquement à partir de la relation (6) (Tableau 4).

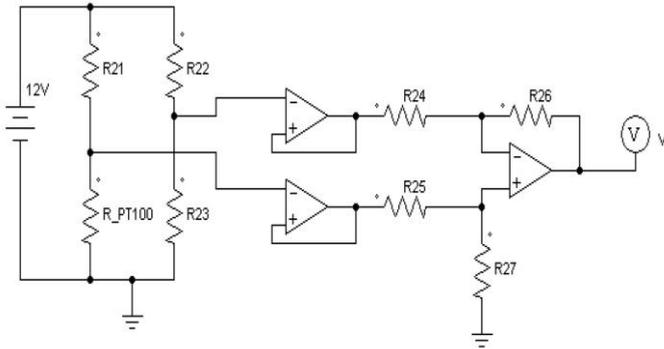


Fig. 14: Schéma de simulation du circuit de mesure de température

**Tableau 4:** Résultats de simulation du circuit de mesure de température

$T$ (°C)	$R_{PT100}$ ( $\Omega$ ) calculée par équation (5)	$V_{Tm-cal}$ (V) Calculée par relation (6)	$V_{Tm-sim}$ (V) Mesurée par simulation	$\Delta V_T$ (%)
0	100	0	0	0
10	103.85	0.51	0.5	0.01
25	109.62	1.27	1.24	0.03
50	11925	2.54	2.51	0.03

## 7. CONCLUSION

Cet article a été consacré à la présentation d'un banc de caractérisation de modules photovoltaïques. Celui-ci a été conçu en ayant comme objectif d'aboutir à un équipement flexible, bon marché et portatif sans pour autant sacrifier les aspects précision et fiabilité. L'architecture du banc ainsi que son fonctionnement ayant été arrêtés et validé par simulation, la prochaine étape portera sur sa réalisation ainsi que sur l'évaluation de ses performances.

## NOMENCLATURE

$V_{oc}$  : Tension de circuit ouvert, V

$I_{sc}$  : Courant de court-circuit, A

$V_{mp}$  : Tension du point de puissance  
maximale, V

$I_{mp}$  : Courant du point de puissance  
maximale, A

$R_{ij}$  : Résistance,  $\Omega$

P : Potentiomètre,  $\Omega$

$V_{PV}$  : Tension aux bornes du module, V

$I_{PV}$  : Courant du module PV, A

A : Gain du capteur de courant

E : Eclairement,  $W/m^2$

$V_E$  : Tension générée par le pyranomètre, V

G : Gain de l'amplificateur de tension, V

$R_{PT100}$ : Résistance de la PT100, $\Omega$	$T$ : Température du module, $^{\circ}\text{C}$
$V_{Pm}$ : Tension en sortie du circuit de mesure de tension, V	$V_{I_{pv}}$ : Tension en sortie du capteur du courant, V
$V_{Im}$ : Tension en sortie du circuit de mesure de courant, V	$V_{Em}$ : Tension en sortie du circuit de mesure de l'éclairage, V
$V_{RL}$ : Tension de commande du relais de déclenchement de la mesure, V	$V_{Tm}$ : Tension en sortie du circuit de conditionnement de température, V

## REFERENCES

- [1] K. Helali, 'Modélisation d'une Cellule Photovoltaïque- Etude Comparative', Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2012.
- [2] A. Ould Mohamed Yahya, A. Ould Mahmoud et I. Youm, 'Etude et Modélisation d'un Générateur Photovoltaïque', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11, N°3, pp. 473 – 483, 2008.
- [3] F. Recart, H. Mäckel, A. Cuevas and R.A. Sinton, 'Simple Data Acquisition of the Current-Voltage and Illumination Voltage Curves of Solar Cells', In Proceedings of 4<sup>th</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Vol. 1, pp. 1215 – 1218, May 2006.
- [4] V. Leite1 and F. Chenlo, 'An Improved Electronic Circuit for Tracing the I-V characteristics of Photovoltaic Modules and Strings', International Conference on Renewable Energies and Power Quality, ICREPQ'10, Granada (Spain), 23<sup>th</sup> to 25<sup>th</sup> March, 2010.
- [5] E. Duran, J.M. Andujar, J.M. Enrique and J.M. Perez-Oria, 'Determination of PV Generator I-V/P-V Characteristic Curves Using a DC-DC Converter Controlled by a Virtual Instrument', International Journal of Photoenergy, Volume 2012, 13 pp., 2012.
- [6] <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>
- [7] A. Mahrane, A. Guenounou, Z. Smara, M. Chikh and M. Lakehal, 'Test Bench for Photovoltaic Modules', International Symposium on Environment Friendly Energies in Electrical Applications, EFEEA'10 Ghardaïa, Algeria, 2-4 November 2010.
- [8] Y. Kuai and S. Yuvarajan, 'An Electronic Load for Testing Photovoltaic', Journal of Power Sources, Vol. 154, N°1, pp. 308 – 313, 2006,
- [9] <http://www.kippzonen.com/>
- [10] G. Asch, 'Les capteurs en Instrumentation Industrielle', Dunod, 2010.
- [11] C. Tavernier, 'Arduino Applications Avancées', Dunod, Paris, 2012.